

Kontrol penjejak optimal pada *photovoltaic* menggunakan *linear quadratic tracking*

Optimal tracking control in photovoltaic using linear quadratic tracking

Mohd Iqbal Muttaqin¹, Said Munzir¹, Marwan Ramli¹, dan Muhammad Ikhwan²

Received 15 May 2021

Accepted 27 August 2021

Published January 2022

¹Program Studi Magister Matematika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Syiah Kuala, Indonesia

²Jurusan Doktor Matematika Aplikasi Sains, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Syiah Kuala, Indonesia

Abstrak. Penelitian ini membahas tentang masalah penjejak pasif *photovoltaic* terhadap posisi matahari secara optimal. Penjejak pasif digunakan ketika penjejak aktif tidak berfungsi. Penjejak pasif menggunakan perhitungan matematika yang rumit untuk penerapannya. Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah *linear quadratic tracking*. *Linear quadratic tracking* merupakan metode analitik yang mengkonstruksi sistem persamaan secara kontrol optimal. Penjejukan oleh *linear quadratic tracking* menghasilkan *risetime*_{18.1418}, mencapai *settling time*_{22.2238}, dan perhitungan *error* dari *Mean absolute error* (MAE) adalah $7,3039 \times 10^{-5}$. Artinya, metode *linear quadratic tracking* yang diterapkan pada PV dapat menjejak cahaya matahari secara pasif dengan sangat cepat dan akurat. Simulasi yang dilakukan terhadap massa panel surya yang bervariasi ternyata dapat mempengaruhi tegangan, arus listrik, dan kecepatan sudut dari PV. Semakin meningkat massa dari panel surya mengakibatkan tegangan dan arus listrik juga meningkat dan respon kecepatan sudut mencapai posisi referensi cenderung lama.

Abstract. This research discusses the problem of optimal passive photovoltaic tracking trajectory of the sun. The passive tracker is used when the active tracker does not work. The passive tracker uses complex mathematical calculations to implement it. The method used in this research is linear quadratic tracking. Linear quadratic tracking is an analytical method that constructs an optimal control system of equations. Tracing by linear quadratic tracking produces rise time $t_{18.1418}$, reaches settling time $t_{22.2238}$, and error (MAE) is 7.3039×10^{-5} . This means that the linear quadratic tracking method for PV can track the sun trajectory very quickly and the level of accuracy is very accurate. Simulations carried out on various masses turned out to be able to affect the voltage, electric current, and angular velocity of the PV. The increasing mass of the solar panels results in increased voltage and electric current and the angular velocity response reaching the reference position tends to be longer.

Keywords: Optimal control, linear quadratic tracking, photovoltaic

Pendahuluan

Konsumsi minyak dunia saat ini lebih tinggi dari jumlah produksinya. Indonesia mulai mengalami defisit neraca minyak sejak 2003 dan kian melebar setiap tahunnya. Berdasarkan data *British Petroleum* (BP) menyebutkan produksi minyak Indonesia sebesar 1,18 juta barel per hari sementara konsumsi minyak mencapai 1,21 juta barel per hari (Kusnandar, 2019). Ini menyebabkan ketersediaan minyak bumi semakin menipis. Para ahli mengemukakan minyak bumi berasal dari zat organik dan terbentuk dari beberapa fase (Haryata, 2019). Karena ketersediaan yang semakin sedikit dan efek dari bahan bakar fosil yang sangat merugikan, beberapa negara telah beralih ke sumber energi baru terbarukan yang lebih ramah lingkungan.

Energi baru terbarukan berasal dari elemen-elemen alam yang tersedia di bumi dalam jumlah besar, misal matahari, angin, sungai, dsb (Silitonga & Ibrahim, 2020). Berdasarkan letak geografisnya, Indonesia terletak di garis ekuator atau garis katulistiwa yang menyebabkan Indonesia mendapatkan paparan cahaya matahari yang

cukup melimpah yaitu 4,8 kWh/m² atau setara dengan 112000 *Global warming potential* (GWP) per-hari (Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi, 2014). Oleh karena itu, Indonesia sangat berpotensi untuk memanfaatkan cahaya matahari untuk dijadikan energi baru terbarukan pengganti bahan bakar fosil.

Para ilmuwan telah menciptakan sebuah alat dalam rangka memanfaatkan energi baru terbarukan yaitu *photovoltaic* (PV) untuk memanen radiasi sinar matahari. Radiasi sinar matahari adalah istilah yang digunakan untuk menunjukkan bagaimana energi dipancarkan dari matahari menuju bumi (Parastiwi *et al.*, 2018). Pancaran sinar matahari inilah yang akan diterima oleh *photovoltaic* (PV) untuk diubah menjadi energi listrik yang nantinya dapat dimanfaatkan untuk kebutuhan rumah tangga, industri dan lain-lain (Parastiwi *et al.*, 2018). Untuk memaksimalkan PV memanen energi radiasi matahari dikenal dengan teknologi penjejak matahari.

Teknologi PV awalnya banyak dikembangkan dengan sistem *fix based* atau berada pada lokasi yang tetap. Namun, saat ini sistem penjejak PV menggunakan

metode *mobile tracking* telah banyak dikembangkan, dimana landasan yang digunakan dapat bergerak (Fasa, 2017). Berdasarkan data masukan yang digunakan, sistem penjejak matahari dibedakan menjadi dua metode yaitu metode aktif dan metode pasif. Metode aktif memanfaatkan data yang dihasilkan dari sensor sensitivitas radiasi matahari, sedangkan metode pasif menggunakan pengaturan manual yang berdasarkan perhitungan posisi matahari (Ganesh *et al.*, 2011).

Berdasarkan jenis mekanismenya, sistem penjejak dibagi menjadi 2, yaitu *single-axis* (penjejak sumbu tunggal) dan *double-axis* (penjejak sumbu ganda). Sistem penjejak sumbu tunggal menggunakan kemiringan panel pada PV dan satu motor listrik untuk memindahkan panel pada lintasan posisi matahari. Rotasi sistem penjejak sumbu tunggal dapat secara horizontal, vertikal, dan miring (Reca-Cardena and López-Luque, 2018). Selanjutnya diikuti dengan penjejak matahari dua sumbu yang melacak posisi matahari berdasarkan *altitude* dan *azimuth* matahari secara bersamaan (Ray and Tripathi, 2016).

Kendali *Type 2 Fuzzy Sling Mode Control* (T2FSMC) yang diterapkan pada *prototype* panel surya telah memanen energi cahaya matahari secara optimal selama 12 jam sehari. Panel surya tersebut bergerak dari timur ke barat secara radial untuk memanen cahaya matahari, dengan kata lain telah berputar sejauh 180° . Penelitian yang dilakukan oleh Mardlijah *et al.* (2017) tersebut menghasilkan *setpoint*. *Setpoint* merupakan kecepatan rata-rata yang harus dilakukan motor sehingga tepat tegak lurus ke arah matahari. Lalu, ditentukan dengan menganggap matahari yang mengitari bumi selama 12 jam atau 43.200 detik sehari dan membentuk sudut 180 derajat atau π rad = 3,14. Dari informasi yang telah dikumpulkan maka nilai *setpoint* yang didapatkan adalah $\frac{3.14}{43.200} = 0,000073 \text{ rad/s}$. Nilai tersebut adalah nilai kecepatan sudut (ω) dan menjadi referensi untuk penelitian ini.

Panel surya pada PV digerakkan oleh motor *direct current* (DC) atau arus searah. Motor DC dapat dimodelkan secara matematika dan sudah dikembangkan oleh Mardlijah *et al.* (2019a) selanjutnya menjadi acuan dalam pengembangan penelitian metode pasif untuk sistem penjejak matahari.

Penelitian yang membandingkan 2 metode antara kontrol *Proportional Integral Derivative* (PID) dan T2FSMC pada *prototype photovoltaic* dilakukan 2 kali percobaan oleh Anggita (2017). Percobaan pertama, sistem mulai mendekati *setpoint* cenderung lama di waktu 4,5544 detik dengan hanya sekali *overshoot* (posisi yang melampaui nilai yang diinginkan), percobaan kedua memerlukan waktu lebih singkat 1,7874 detik untuk mencapai *setpoint* dan hanya sekali *overshoot*. Pada penelitian tersebut menghasilkan informasi tentang posisi sudut motor penggerak yang tepat berdasarkan kecepatan

sudut yang konstan. Namun, masih mengalami *overshoot* cukup besar dan mencapai *setpoint* yang cenderung lama.

Berbeda dengan Anggita, penelitian penjejak pasif menggunakan *model predictive control* (MPC) pada sistem penjejak dua sumbu yang dilakukan oleh (Ikhwan and Imron, 2018) menghasilkan *overshoot* maksimum yang cukup besar pada waktu 0,1697 detik atau $6,5198^\circ$. MPC membutuhkan waktu 0,5937 untuk mencapai posisi stabil. Pada uji respons sistem terhadap sudut *azimuth* membentuk respon yang sangat baik, yaitu *rise time* (waktu yang diukur mulai dari respon pada awal waktu) sekitar 0,1678 detik, mencapai posisi *settling time* (waktu yang menyatakan respons telah masuk keadaan setimbang) yaitu 0,5044 detik. Namun, terjadi *overshoot* beberapa kali dengan maksimum pada waktu 0,2507 detik.

Penelitian ini berfokus pada sistem kendali pasif, maka posisi awal atau posisi matahari di set ke sudut 0° dan tenggelam pada 180° . Sistem kendali ini tidak berdasarkan sudut, namun berdasarkan kecepatan sudut (ω). Penelitian ini terbatas pada kondisi *equinox* yaitu matahari tepat berada di katulistiwa. Sistem pasif memiliki kekurangan dari proses mulai yang tidak menggunakan sensor. Artinya sistem akan aktif bergerak sejak matahari masih di ufuk timur. Walaupun energi belum bisa diserap oleh panel surya, namun arah gerakannya sudah sesuai dengan sudut matahari.

LQT adalah metode kontrol optimal yang meminimalisir fungsi tujuan (*Performance Index*) dan mengatur sistem (*Plant*) agar melakukan penjejakan sesuai referensi yang diinginkan (Naidu, 2018). Aktuator sistem kendali merupakan hasil dari pengendali pasif. Aktuator sendiri menggunakan nilai voltase yang dihasilkan dari LQT berdasarkan model dan *setpoint* yang telah ditentukan. LQT dipilih karena menggunakan pendekatan secara analitik dan sering digunakan untuk masalah penjejakan.

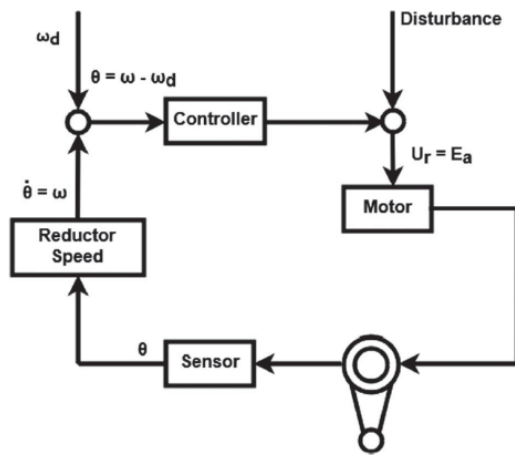
Permasalahan yang telah diuraikan menjadi menarik untuk dikaji apabila LQT diterapkan pada sistem penjejak PV secara metode pasif. Tujuan dari penelitian ini adalah mengendalikan motor untuk menggerakkan panel surya sedemikian sehingga tegak lurus ke arah matahari dengan perhitungan secara analitik. Sehingga pada tulisan ini akan menghasilkan dan menganalisis penerapan LQT pada PV sumbu tunggal dengan kendali pasif saja, lalu melakukan analisis simulasi dengan mengganti beberapa variasi nilai parameter momen inersia (J) terhadap model matematika motor DC.

Model

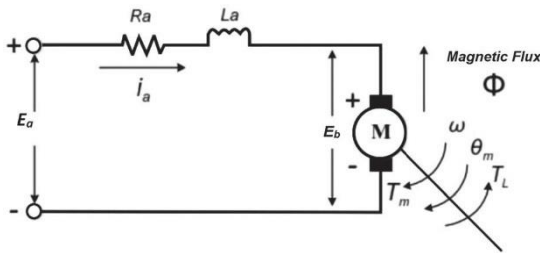
Panel surya dirancang untuk menghasilkan energi baru terbarukan dengan mengubah radiasi yang dihasilkan dari cahaya matahari ke energi listrik. Cara kerja sistem pada panel surya (Gambar 1) yang diinginkan adalah mengendalikan penggerak pada panel surya agar panel surya tegak lurus mengikuti posisi matahari. Dengan demikian kolektor bisa menyerap energi matahari secara

maksimal. Untuk mencapai kondisi PV tegak lurus terhadap sinar matahari, PV di kontrol oleh motor DC (Golnaraghi dan Kuo, 2010).

DC motor menjadi bagian yang sangat penting dalam rangkaian PV karena berfungsi untuk menggerakkan panel surya. Pada bagian ini akan diceritakan bagaimana membangun model matematika motor DC secara linear. Sesuai Gambar 2 sebuah rangkaian yang dimodelkan dari sirkuit dengan R adalah resistansi yang dihubungkan secara seri dengan L adalah induktansi, dan sumber tegangan E_b direpresentasikan sebagai ggl balik (gaya gerak listrik) pada saat rotor berputar (Golnaraghi dan Kuo, 2010).



Gambar 1 Cara kerja sistem panel surya. Diproduksi ulang sesuai dengan lisensi CC BY-NC-ND 4.0 (Mardijah *et al.*, 2019b).



Gambar 2 Cara kerja DC motor. Diproduksi ulang sesuai dengan lisensi CC BY-NC-ND 4.0 (Mardijah *et al.*, 2019b).

Gambar 2 menunjukkan kontrol pada motor DC yang diterapkan pada rangkaian adalah E_a . Untuk analisis secara linear, kita asumsikan bahwa torsi yang dihasilkan oleh motor sebanding dengan flux magnetik ϕ dan kuat arus i_a pada rangkaian, menjadi

$$T_m(t) = K_m(t)\phi i_a(t) \quad (1)$$

Karena ϕ adalah konstan, maka persamaan (1) menjadi

$$T_m(t) = K_m i_a(t) \quad (2)$$

Dimana K_m adalah konstanta torque.

Dimulai dengan kontrol input tegangan E_a , sedemikian sehingga persamaan untuk rangkaian motor pada Gambar 2 adalah

$$\frac{di_a(t)}{dt} = \frac{1}{L_a} e_a(t) - \frac{R_a}{L_a} i_a(t) - \frac{1}{L_a} e_b(t) \quad (3)$$

$$T_m(t) = K_m i_a(t) \quad (4)$$

$$e_b(t) = K_b \frac{d\theta}{dt} \quad (5)$$

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = \frac{1}{J} T_m(t) - \frac{1}{J} T_L(t) - \frac{B}{J} \frac{d\theta}{dt} \quad (6)$$

Dimana $T_L(t)$ direpresentasikan sebuah gesekan torsi. Jika $T_L(t)$ atau gesekan torsi dapat diabaikan yang berarti $T_L(t) = 0$ dan $\int \frac{d^2\theta}{dt^2} = \frac{d\theta}{dt} = \omega$, maka model sistem persamaan matematika motor DC adalah

$$\frac{di_a(t)}{dt} = \frac{1}{L_a} (e_a(t) - R_a i_a(t) - K_b \omega(t)) \quad (7)$$

$$\frac{d\omega(t)}{dt} = \frac{1}{J} (K_m i_a(t) - B \omega(t)) \quad (8)$$

(Golnaraghi dan Kuo, 2010)

Keterangan :

$e_a(t)$	: Tegangan masuk (Volt)
$e_b(t)$	: Electromotive force (emf) balik (Volt)
$i_a(t)$	: Arus listrik (Ampere)
$R_a(t)$	: Hambatan (Ohm)
$L_a(t)$	: Induktansi (Henry)
K_b	: Konstanta emf balik (Volt-sec/rad)
K_m	: Konstanta Torque (N-m/Ampere)
J	: Momen inersia rotor (Kg - m ²)
B	: Koefisien gesekan viskos (N-m/rad/sec)
$T_m(t)$	: Torsi motor (N-m)
$\omega(t)$	: Kecepatan sudut motor (rad/sec)
$\theta(t)$	: Posisi sudut (rad)

(Golnaraghi dan Kuo, 2010).

Fokus kita adalah melakukan perhitungan pada sistem, sedemikian sehingga PV bergerak tegak lurus dengan posisi matahari. Jadi kita dapat mengkonstruksi fungsi objektif yang meminimalisir kecepatan sudut secara cepat berada pada posisi referensi (*setpoint*) $\omega_{ref} = 0,000073$ sampai akhir waktu.

$$J = \frac{1}{2} [\omega_{ref} - \omega_{t_f}]^2 + \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} [\omega_{ref} - \omega_t]^2 + \alpha u^2 dt \quad (9)$$

Dengan waktu awal adalah t_0 dan waktu akhir t_f dan konstanta α yang bernilai 0.002.

Analisis analitik

Seperti penjelasan di atas LQT adalah metode kontrol optimal yang meminimalisir fungsi tujuan (*performance index*) (9) dan mengatur sistem (*Plant*) (7) dan (8) agar melakukan penjejakkan sesuai posisi referensi yang diinginkan referensi (*setpoint*) $\omega_{ref} = 0,000073$. Untuk menerapkan *linear quadratic tracking*, sistem persamaan motor DC terlebih dahulu diinisialisasi menjadi persamaan berbentuk matriks sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} \frac{di_a(t)}{dt} \\ \frac{d\omega(t)}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L_a} & -\frac{K_b}{L_a} \\ \frac{K_m}{J} & \frac{B}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_a} \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (10)$$

$$y = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ \omega \end{bmatrix} \quad (11)$$

Persamaan *state* dapat diekspresikan sebagai berikut:

$$\dot{x}(t) = A(t)x(t) + B(t)u(t) \quad (12)$$

$$y(t) = C(t)x(t) \quad (13)$$

Secara metode, kita dapat membentuk persamaan kontrol optimal yang closed loop sebagai berikut:

$$u^* = -K(t)x^*(t) + R^{-1}(t)B'(t)g(t) \quad (14)$$

Dimana $K(t) = R^{-1}(t)B'(t)P(t)$ adalah *Kalman gain*, dan $P(t)$ adalah solusi dari persamaan nonlinier differensial *Riccati* berbentuk matriks $n \times n$ dan *positive definite*, matriks persamaan nonlinier differensial *Riccati* (DRE) dapat dibentuk sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \dot{P}(t) = & -P(t)A(t) - A'(t)P(t) + \\ & P(t)E(t)P(t) - V(t) \end{aligned} \quad (15)$$

Dengan kondisi akhir

$$P(t_f) = C'(t_f)F(t_f)C(t_f) \quad (16)$$

dan $g(t)$ adalah solusi linear dari nonhomogeneous persamaan differensial vektor

$$\dot{g}(t) = [P(t)E(t) - A'(t)]g(t) - W(t)z(t) \quad (17)$$

Dengan kondisi akhir

$$g(t_f) = C'(t_f)F(t_f)z(t_f) \quad (18)$$

dimana

$$E(t) = B(t)R^{-1}(t)B'(t), \quad (19)$$

$$V(t) = C'(t)Q(t)C(t), \quad (20)$$

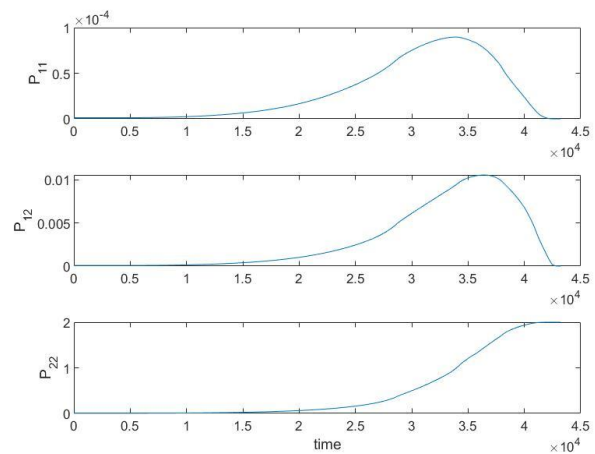
$$W(t) = C'(t)Q(t). \quad (21)$$

Selanjutnya, $x^*(t)$ merupakan solusi dari persamaan *state* yang dibentuk sebagai berikut:

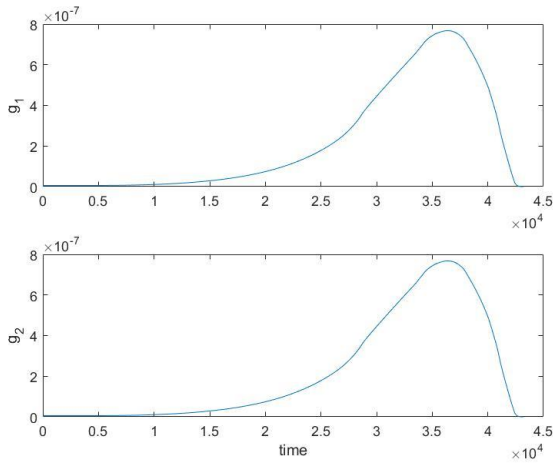
$$\dot{x}^*(t) = [A(t) - E(t)P(t)]x^*(t) + E(t)g(t). \quad (22)$$

Simulasi Penjejakan

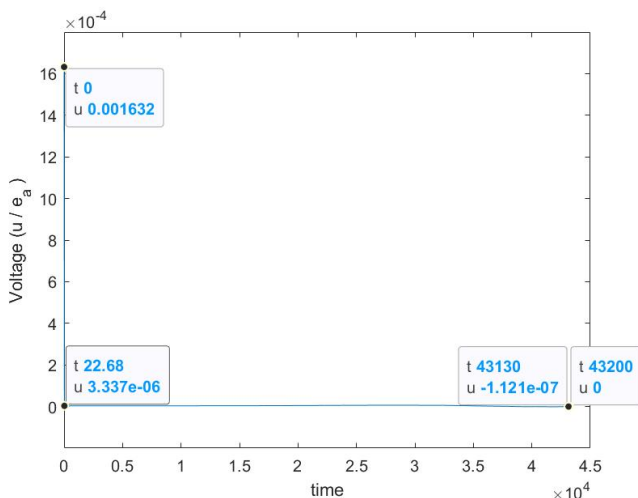
Semua perhitungan dilakukan dengan *software* MATLAB karena cukup sulit mencari solusi-solusi dari persamaan yang telah dibentuk. Untuk persamaan nonlinier differensial *Riccati* dan vektor g diselesaikan secara numerik, solusinya dapat dilihat pada Gambar 3 dan 4.



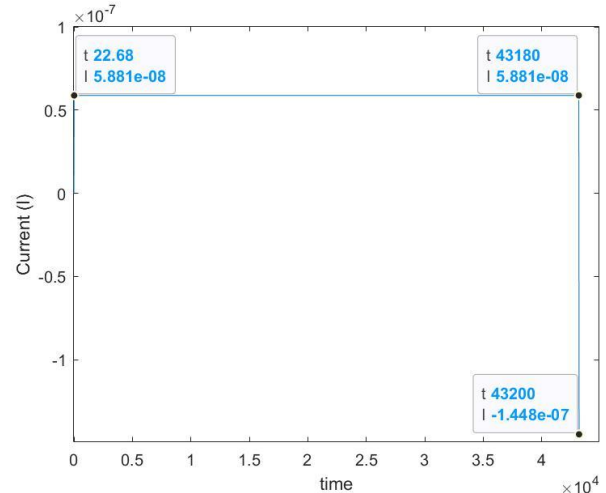
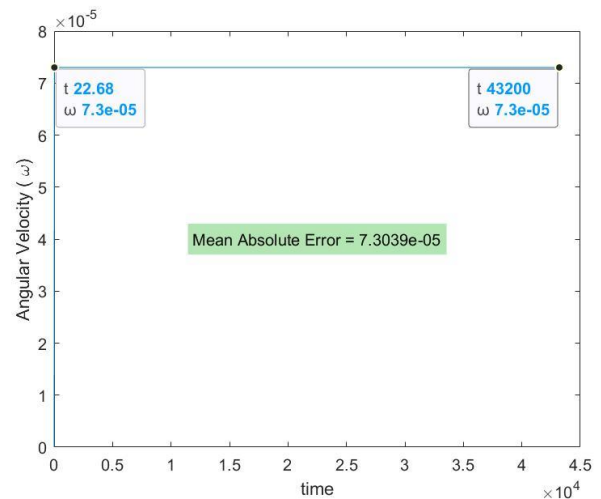
Gambar 3 Solusi nonlinier differensial *Riccati*.

Gambar 4 Solusi persamaan Vektor g .

Solusi dari persamaan kontrol optimal (tegangan) ditunjukkan pada Gambar 5. Tegangan yang cukup besar diawal diperlukan untuk menggerakkan PV yang masih dalam keadaan diam. Selanjutnya ketika kecepatan sudut dari PV telah mencapai nilai yang diinginkan atau pada posisi referensi maka tegangan yang diberikan tidak lagi besar, cukup memberikan tegangan yang dapat mempertahankan kecepatan sudut pada PV. Pada akhir waktu nilai tegangan menjadi negatif, hal ini terjadi dalam perhitungan dan dapat diartikan bahwa ketika PV yang sedang bergerak memerlukan gaya yang berlawanan untuk menghentikannya.

Gambar 5 Solusi persamaan *control* u (tegangan listrik).

Gambar 6 adalah solusi dari perhitungan persamaan *state* I (kuat arus). Kuat arus yang naik cukup tinggi pada awal waktu disebabkan oleh tegangan yang diberikan ke sistem cukup besar. Tegangan menjadi penyebab kuat arus berada pada posisi konstan dan pada akhri waktu bernilai negatif. Kuat arus sangat dipengaruhi oleh tegangan dan dalam kasus ini karena hambatan yang konstan dan kecepatan sudut yang diinginkan cepat mencapai nilai referensimaka nilai kuat arus berbanding lurus dengan nilai tegangan.

Gambar 6 Solusi persamaan *State* I (kuat arus).Gambar 7. Solusi persamaan *State* ω (kecepatan sudut).

Terakhir, Gambar 7 adalah Solusi dari perhitungan persamaan *state* ω (kecepatan sudut). Pada gambar terlihat bahwa kecepatan sudut untuk PV mengalami respons yang cukup baik. Tegangan yang besar diawal waktu menciptakan kuat arus yang proporsional untuk menggerakkan PV mencapai kecepatan sudut pada posisi referensi dengan sangat cepat. Hal tersebut dibuktikan oleh waktu *risetime* $t_{18.1418}$ dan waktu mencapai posisi tunak (*settling time*) yaitu sekitar $t_{22.2238}$. *Error* yang dihasilkan dari perhitungan *Mean Absolute Error* (MAE) adalah $7,3039 \times 10^{-5}$. Persamaan *state* ω (kecepatan sudut) telah berhasil menjejak nilai referensi ω_{ref} (*setpoint*) sampai waktu akhir t_{43000} atau 43200 detik dan memiliki selisih *error* yang sangat kecil. Artinya, PV telah bergerak dari t_0 sampai t_{tf} atau 43200 detik menjejak matahari sesuai kecepatan sudut referensi dan karena MAE yang didapat sangat kecil maka ketelitiannya sangat akurat.

Simulasi Variasi Panel Surya

Pada motor DC, momen inersia dipengaruhi oleh sekrup yang berputar secara 360 derajat. Momen inersia yang

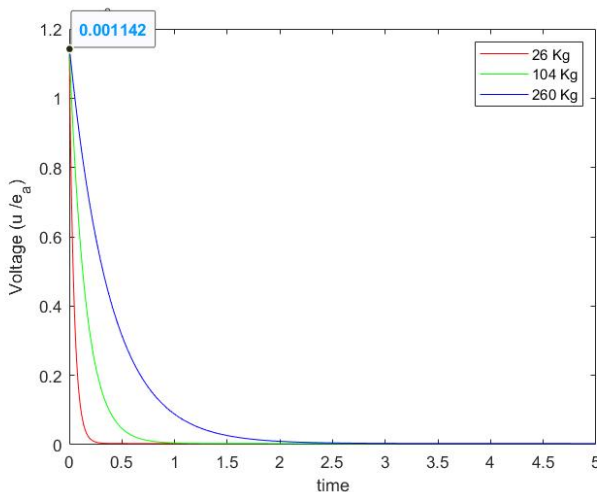
dinotasikan dengan J berhubungan langsung dengan massa. Model matematika motor DC dihasilkan dari uji lab pada *prototype* yang panel suryanya memiliki massa 2,3 kg dan diameter sekrup 4 mm. Nilai parameter momen inersia didapat dari persamaan momen inersia pada sekrup motor DC, dengan penjelasan sebagai berikut

$$J = m \left(\frac{L}{2\pi} \right)^2 \quad (23)$$

Dimana J adalah momen inersia, m adalah massa, dan L adalah diameter sekrup (Juvinall and Marshek, 2012).

Simulasi pada penelitian ini menggunakan nilai massa sebagai berikut, 26 kg, 104 kg, dan 260 kg. Nilai massa tersebut menggambarkan massa dari panel surya dan dipilih secara acak. Lalu dengan menggunakan Pers (23) didapatkan nilai parameter dari momen inersia yang bervariasi sebagai berikut $J_1 = 0,0012$, $J_2 = 0,0041$, dan $J_3 = 0,0103$.

Selanjutnya, digunakan kembali metode kendali LQT dan perhitungannya pada MATLAB didapat hasil yang cukup menarik. Hasil perhitungan berupa visualisasi dengan rentang waktu yang singkat, karena hanya ingin melihat bagian yang mengalami perubahan. Berikut visualisasinya

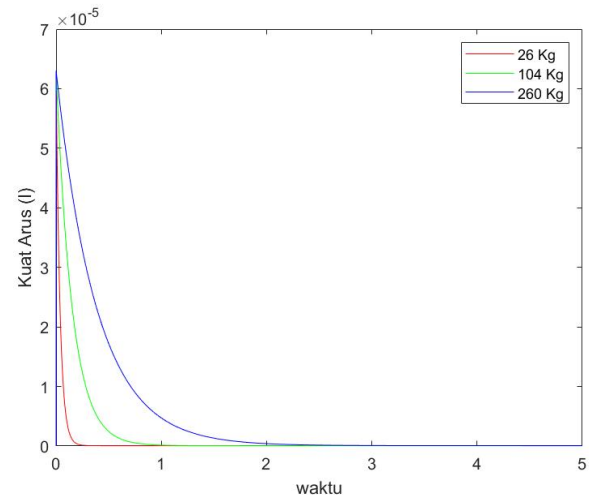


Gambar 8 Solusi persamaan *control* variasi (J)

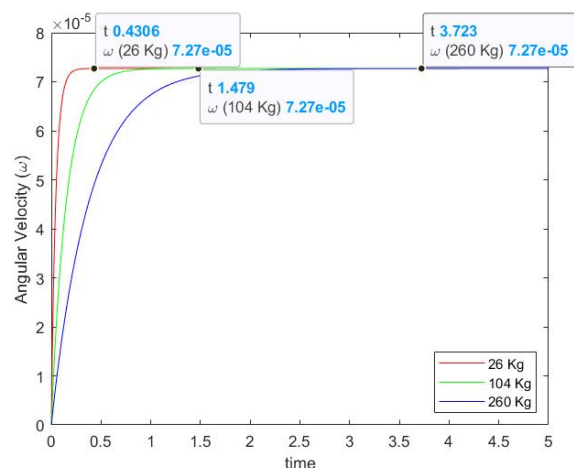
Pada Gambar 8 dapat dilihat bahwa kontrol yang diberikan tegangan listrik untuk masing-masing rangkaian sistem diawali dengan 0,001142 Volt. Pada Gambar 8 terlihat tegangan pada rangkaian PV yang panel suryanya 26 kg turun lebih dulu, diikuti PV yang panel suryanya 104 kg dan yang terakhir PV yang panel surya nya 260 kg. Hal yang menarik dari Gambar 8 adalah penurunan tegangan dari masing-masing PV, terlihat bahwa PV yang massa panel suryanya semakin besar maka memerlukan tegangan yang semakin besar untuk menggerakkannya. Peristiwa ini dipengaruhi oleh massa dari panel surya, menciptakan

inersia yang besar menyebabkan kelembaman yang semakin besar pada PV dan kecenderungan PV untuk mempertahankan posisinya dalam keadaan diam juga semakin besar. Oleh karena itu semakin besar massa dari panel surya maka semakin besar pula tegangan yang diperlukan.

Gambar 9 merupakan solusi untuk persamaan *state I*. Pada awal waktu t_0 kuat arus pada masing-masing rangkaian adalah 0 lalu seketika naik menuju nilai tertinggi yaitu $6,263 \times 10^{-5}$ dengan waktu $t_{0,000326}$ untuk rangkaian yang panel suryanya 26 kg, diikuti PV yang panel suryanya 104 kg pada nilai $6,293 \times 10^{-5}$ dengan waktu $t_{0,000382}$ dan yang terakhir adalah PV yang panel suryanya 260 kg pada nilai $6,301 \times 10^{-5}$ dengan waktu $t_{0,000425}$. Telah terjadi perbedaan kuat arus pada masing-masing rangkaian. Semakin besar massa PV maka semakin besar nilai kuat arus yang terbentuk. Hal ini terjadi akibat nilai tegangan yang berbeda disetiap rangkaian



Gambar 9 Solusi persamaan *State I* variasi (J)



Gambar 10 Solusi persamaan *State ω* variasi (J)

Pada Gambar 10 dapat dilihat respon yang berbeda. Rangkaian PV yang massa panel suryanya 26 kg terlihat lebih dulu mencapai posisi referensi pada waktu $t_{0,4306}$

lalu diikuti PV yang panel suryanya 104 kg pada waktu $t_{1,479}$ dan yang terakhir PV yang panel suryanya 260 kg pada waktu $t_{3,723}$. Hal yang menarik terjadi pada hasil dari masing-masing waktu pencapaian titik referensi. Terlihat bahwa rangkaian PV yang massa panel suryanya lebih besar lebih lama mencapai posisi referensi. Hal tersebut terjadi karena massa pada rangkaian PV yang menciptakan kelembaman yang besar, menyebabkan respon sistem yang lama untuk sampai pada posisi referensi.

Kesimpulan

Hasil perhitungan nilai *risetime* dan *settling time* dari kendali LQT menunjukkan respons yang cepat untuk menjejak cahaya matahari berdasarkan *setpoint* yang telah ditentukan. Hasil perhitungan *error* yang sangat kecil dari *mean absolute error* (MAE) menunjukkan kendali LQT mampu menjejak cahaya matahari dengan sangat akurat. Selanjutnya Massa panel surya ternyata dapat mempengaruhi kondisi dari tegangan, kuat arus dan kecepatan sudut. Semakin besar massa dari panel surya maka inersia dan kelembamannya semakin besar menyebabkan kecenderungan PV mempertahankan posisi diam juga semakin besar. Oleh sebab itu gerakan PV semakin lama mencapai posisi referensi, membutuhkan tegangan yang lebih, dan nilai kuat arus yang sebanding dengan tegangan. Metode LQT secara matematika menghasilkan perhitungan yang optimal dan sangat cocok untuk diterapkan di dunia *engineering* sebagai metode penjejak.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih ditunjukan kepada orang tua, dosen pembimbing, dan teman-teman yang telah membantu menyelesaikan penulisan paper ini.

Referensi

Anggita, F. (2017) Perbandingan kontrol PID dan T2FSCM pada prototype panel surya dengan mempertimbangkan intensitas cahaya. *Doctoral dissertation, Institut Teknologi Sepuluh Nopember*. Surabaya, Indonesia.

Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi. (2014) Outlook Indonesia Energi. *Pusat Teknologi Pengembangan*

Sumberdaya Energi (PTPSE) dan Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT). Jakarta, Indonesia.

Fasa, N. (2017). Perancangan *mobile passive two axis solar tracker* pada photovoltaic menggunakan kendali logika Fuzzy-PI. *PhD Thesis, Institut Teknologi Sepuluh Nopember*. Surabaya, Indonesia.

Ganesh, N. J., Maniprakash, S., Chandrasekaran, L., Srinivasan, S. M., dan Srinivasa, A. R. (2011) Design and development of a sun tracking mechanism using the direct SMA actuation. *Journal of Mechanical Design*. **133** (7): 1-8.

Golnaraghi, F., dan Kuo, B. C. (2010) Automatic control systems 9th Edition. *McGraw-Hill Education*. New York, USA.

Haryata, Y. (2019) Minyak bumi membuat dunia terkesima 1st edition. *Penerbit Duta*. Bandung, Indonesia.

Ikhwan, M., dan Imron, C. (2018) Model predictive control on dual axis solar tracker using Matlab/Simulink simulation. *International Conference on Information and Communications Technology (ICOIACT)*.

Juvinall, R. C., dan Marshek, K. M. (2020) Fundamentals of machine component design. *John Wiley & Sons*. New York, USA.

Kusnandar, V. B. (2019) Defisit neraca minyak indonesia kian melebar. *Databoks Available at: https://databoks.katadata.co.id/datapublish*.

Mardlijah, Bagus P. S., and Rinanto, N. (2019) Mathematical model's parameters identification in a prototype of solar panel's motor. *IOP Conference. Series: Journal of Physics*. **1218**: 012054.

Mardlijah, G. Z., Adzkiya, D., Mardianto, L., dan Ikhwan, M. (2019) Modified T2FSCM Approach for Solar Panel Systems. *Systems Science & Control Engineering*. **7**(1): 189-197.

Mardlijah, Rinanto, N., dan Soemarsono, A. R. (2017) Type 2 fuzzy slidingmode control (t2fsmc) controller on solar panel prototype using the most representative parameters. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*. **95**(20): 5562-5570.

Naidu, D. S. (2018) Optimal control systems. *CRC press*. New York, USA.

Parastiwi, A., Putri, R.I., Adhisuwarnjo, S., dan Rifa'i, M. (2018) Photovoltaic Terapan Teknologi dan Implementasi. *UPT Percetakan dan Penerbitan Polinema*. Malang, Indonesia.

Silitonga, A., dan Ibrahim, H. (2020) Buku ajar energi baru dan terbarukan. *Deepublish*. Yogyakarta, Indonesia.